

**Verfahren zur Bestimmung der Brechzahl bei interferometrischen Längenmessungen und Interferometeranordnung hierfür**

- 5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Brechzahl und/oder Kompensation des Brechzahleinflusses bei interferometrischen Längenmessungen mit Hilfe eines mit wenigstens zwei Messstrahlen mit wenigstens definierten, etwa in einem harmonischen Verhältnis zueinander stehenden Frequenzen beaufschlagten Interferometers, an dessen
- 10 Ausgang interferometrisch Phasen für die wenigstens zwei Messstrahlen ausgewertet werden, wobei eine dem harmonischen Verhältnis der Frequenzen der Messstrahlen entsprechende Multiplikation der interferometrischen Phasen vorgenommen und wenigstens eine Phasendifferenz der so gebildeten Phasenwerte betrachtet wird.
- 15
- Die Erfindung betrifft ferner eine Interferometeranordnung zur Durchführung des Verfahrens mit wenigstens einer kohärenten Strahlenquelle zur Generierung wenigstens zweier Messstrahlen mit definierten, etwa in einem harmonischen Verhältnis zueinander stehenden Frequenzen und
- 20 einem Interferometer, dessen Ausgangssignale auf einen die Messstrahlen trennenden Strahlteiler gelangen, wobei die getrennten Messstrahlen auf opto-elektronische Wandler gelangen und wenigstens eines der Ausgangssignale der opto-elektronischen Wandler einem dem harmonischen Verhältnis der Frequenzen der Messstrahlen entsprechenden Multiplikator
- 25 zugeführt wird.

Es ist bekannt, Abstandsmessungen bzw. Messungen von Längenänderungen physikalischer Längen mit Hilfe eines Interferometers durchzuführen. Bei einer derartigen Messung wird die optische Weglänge gemessen, die sich aus der physikalischen Weglänge und der integralen Brechzahl des Mediums auf der gemessenen Weglänge zusammensetzt. Der Einfluss der Brechzahl auf die Messung kann dadurch eliminiert werden, dass die interferometrische Messung mit zwei definierten unterschiedlichen Wellenlängen durchgeführt wird. Da die Brechzahl von der Wellenlänge abhängt, die physikalische Weglänge hingegen von der Wellenlänge unabhängig ist, lassen sich so Informationen über die physikalische Weglänge und die Brechzahl voneinander trennen.

US 4,948,254 beschreibt eine Vorrichtung, die nach dieser Dispersionsmethode arbeitet. Die beiden Wellenlängen werden von einem Argon-Ionen-Laser in Kombination mit einem Frequenzverdopplerkristall geliefert. Durch die Verwendung einer Grundwelle und einer frequenzverdoppelten Welle erhält man für die Interferometrie zwei Wellen, die grundsätzlich phasenstarr sind. Der Verdopplerkristall befindet sich am Anfang der Messstrecke am Messarm eines Zweistrahl-Interferometers. Die hinlaufende Grundwelle erzeugt im Kristall eine kollinear laufende Oberwelle. Beide Wellen durchlaufen die Messstrecke. Beim Rücklauf durch den Kristall erzeugt die Grundwelle eine zweite Oberwelle, die aufgrund der Dispersion im durchlaufenden Medium eine Phasendifferenz gegenüber der ersten Oberwelle aufweist. Diese Phasendifferenz, die gemessen werden muss, stellt das Messsignal dar. Sie ist ein Maß für die Dispersion und damit für die Brechzahlen. Die Phasendifferenz ist nur gering von anderen Einflüssen, wie Position und Bewegungszustand des Interferometers abhängig, sodass die Phasendifferenz ein brauchbares Messsignal für eine genaue Messung darstellt. Problematisch ist allerdings, dass eine

genaue Bestimmung der Phasen aufwändig und mit prinzipiellen Messunsicherheiten belastet ist.

US 5,404,222 beschreibt ein ähnliches System, bei dem der Verdopplerkristall vor dem Eintritt des verwendeten Lichts in das Interferometer durchlaufen wird. Außerdem findet eine Frequenzverdopplung am Ausgang des Interferometers statt.

Zur Verbesserung der Messgenauigkeit ist beispielsweise aus US 5,838,485 ein sogenanntes Superheterodyn-Interferometer bekannt. Auch hier wird ein Zwei-Wellenlängen-Interferometer mit harmonisch korrelierten optischen Wellen verwendet, um die Kompensation des Brechzahleinflusses mittels der Dispersionsmethode durchzuführen. Bei dem Superheterodyn-Interferometer werden die interferometrischen Phasen der optischen Grund- und Oberwelle jeweils auf Hochfrequenz-Heterodynfrequenzen abgebildet. Die interferometrische Phase des Heterodynsignals der Grundwelle wird verdoppelt. Die Differenz dieser verdoppelten Phase und der Phase des Heterodynsignals der Oberwelle ist proportional zur Dispersion. Der Vorteil der Superheterodyn-Interferometer besteht darin, dass die Empfindlichkeit der Brechzahlkompensation bezüglich der mechanischen Stabilität des Interferometers wesentlich geringer ist. Die erzielbare Genauigkeit der Messung wird jedoch durch die Bestimmung der Phasendifferenz begrenzt. Die Phasenmessungen müssen für die Hochfrequenzsignale um 1 bis 2 Größenordnungen genauer erfolgen als bei der eigentlichen Längenmessung. Für die Bestimmung der Phasendifferenz ist die Messung zweier unabhängiger Phasen notwendig. Möglichen Nichtlinearitäten bei der Phasenmessung beeinflussen die Messunsicherheit. Die Differenzphase ändert sich periodisch mit der Messstrecke, sodass die Brechzahlbestimmung nicht eindeutig ist. Weiter ist zur Bestimmung der Brechzahl eine Änderung der

Messstrecke erforderlich. Das Verfahren ist somit nur für brechzahlkompensierte Verschiebemessungen, nicht jedoch für brechzahlkompensierte Positionsmessungen, beispielsweise in einem absolut messenden Interferometer, geeignet.

5

Aus US 2002/0001086 A1 ist es ferner bekannt, ein Zwei-Wellenlängen-Interferometer mit einem Refraktometer zu kombinieren, das in der Nähe der interferometrisch zu messenden Strecke plaziert ist. Das Refraktometer, das beispielsweise aus einem abgeglichenen Interferometer fester  
10 Weglängen besteht, wobei die Referenzstrecke im Vakuum und die Messtrecke in der Umgebungsluft verläuft, dient der Messung der Langzeitänderungen der Brechzahl und kann bei sich ändernder Luftzusammensetzung zur Bestimmung der inversen Dispersion  $A$  benutzt werden. Mit dieser Ergänzung kann die Brechzahl absolut und eindeutig bestimmt  
15 werden.

Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung der eingangs erwähnten Art so zu verbessern, dass eine genauere Kompensation der Brechzahleinflüsse für Präzisionslängenmessungen möglich ist.  
20

Zur Lösung dieser Aufgabe ist erfindungsgemäß das Verfahren der eingangs erwähnten Art dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens einer der Messstrahlen in seiner Frequenz variierbar ist und dass aus der gebildeten Phasendifferenz ein Steuersignal zur Veränderung der Frequenz des  
25 in seiner Frequenz veränderbaren Messstrahls gebildet wird, mit dem die Frequenz so geregelt wird, dass die Phasendifferenz zu Null wird.

Zur Lösung der Aufgabe ist erfindungsgemäß ferner eine Vorrichtung der eingangs erwähnten Art dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens einer  
30 der Messstrahlen in seiner Frequenz mittels einer Frequenzsteuerung vari-

ierbar ist und dass mittels eines Phasenvergleichers für die Phasen der Ausgangssignale der opto-elektrischen Wandler ein eine Phasendifferenz repräsentierendes Steuersignal generiert und der Frequenzsteuerung zur Bildung eines Regelkreises für die interferometrischen Phasen zugeleitet wird.

Erfindungsgemäß wird ein interferometrischer Phasenregelkreis realisiert, der dafür sorgt, dass die integralen optischen Wellenlängen der beiden im Interferometer umlaufenden Strahlen entlang der Messstrecke exakt harmonisch korreliert sind. Die Korrelation entspricht dem harmonischen Frequenzverhältnis der Felder der Zwei-Frequenz-Strahlungsquelle. Hierfür wird die Frequenz eines der Messstrahlen um einen gewissen Frequenzbetrag, der Offset-Frequenz, verstellt. Die Differenzfrequenz zwischen dem exakt harmonischen Frequenzverhältnis und der durch den Regelkreis eingestellten Frequenz ist ein direktes Maß für die integrale Brechzahl auf der Messstrecke. Die Offset-Frequenz lässt sich leicht messen und ist insbesondere unabhängig von der Länge der Messstrecke und von mechanischen Instabilitäten des Interferometers. Da die Messung der Brechzahl erfindungsgemäß auf eine Frequenzmessung zurückführbar ist, wird prinzipiell eine höhere Messgenauigkeit erreicht, da Frequenzen sehr genau messbare physikalisch Größen sind. Weiterhin ist die Frequenzmessung im Gegensatz zur Messung einer periodischen Phase a priori eindeutig und prinzipiell ohne Effektmodulation messbar.

Die Messung der Offset-Frequenz erfolgt vorzugsweise dadurch, dass wenigstens ein Referenzstrahl mit einer Frequenz erzeugt wird, die etwa der Frequenz eines der Messstrahlen entspricht und mit der Frequenz eines anderen Messstrahls gekoppelt ist und dass eine Frequenzdifferenz zwischen der Frequenz des Referenzstrahls und der Frequenz des entsprechenden Messstrahls gemessen wird.

Das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäße Interferometer-Anordnung können durch die Anwendung des Superheterodyn-Prinzips modifiziert werden. Insbesondere können dabei den überlagerten Messstrahlen in einem Referenzzweig des Interferometers Hochfrequen-  
5 zen aufmoduliert werden, die im gleichen harmonischen Verhältnis zueinander wie die Frequenzen der Messstrahlen stehen.

In einer weiteren Modifikation der vorliegenden Erfindung können auch unterschiedliche Polarisationskomponenten verwendet werden, wobei  
10 eine Polarisationskomponente gegenüber der anderen um  $\pi/2$  mittels einer  $\lambda$ -Verzögerungsplatte verschoben werden kann. Dadurch wird erreicht, dass für eine genaue Auswertung immer Signalanteile zur Verfügung stehen, die nicht Null sind und daher gut messbar sind.

15

20

25

30

Die Erfindung soll im Folgenden anhand von in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert werden. Es zeigen:

- 5           Figur 1       eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Interferometeranordnung
- Figur 2       eine schematische Darstellung einer Ausführungsform der erfindungsgemäßen Interferometeranordnung als Superheterodyn-Interferometer mit zwei Laserquellen
- 10           Figur 3       eine Variante der Ausführungsform gemäß Figur 2 mit einer einzigen Laserquelle.

15           In der Ausführungsform gemäß Figur 1 ist ein Laser L1 als kohärente Strahlungsquelle vorgesehen, der einen Laserstrahl mit der Frequenz  $\nu_1$  als Referenzstrahl und mit einer zweiten Frequenz  $\nu_2$  als ersten Messstrahl aussendet. Der Laser L1 kann beispielsweise ein Second Harmonic Generator (SHG) Laser sein, der neben seiner Fundamentalfrequenz  $\nu_1$  auch ein frequenzverdoppeltes Feld  $\nu_2 = 2\nu_1$  emittiert. Die Anwendung

20           der Erfindung ist aber nicht auf eine Frequenzverdopplung beschränkt. Wesentlich ist eine harmonische Korrelierung der Frequenzen in der allgemeinen Form  $k_1 \cdot \nu_1 = k_2 \cdot \nu_2$ , wobei  $k_1$ ,  $k_2$  natürliche Zahlen sind. In einer bevorzugten, einfach zu realisierenden Form gilt  $\nu_2 = N \cdot \nu_1$  ( $N$  natürliche Zahl  $> 1$ ).

25

Eine zweite Laserquelle L2 emittiert einen Laserstrahl mit einer dritten Frequenz  $\nu_3$ , die der Frequenz  $\nu_1$  entspricht.

30           In dem dargestellten Ausführungsbeispiel ist die Ausgangsfrequenz des Lasers L2 durch eine Frequenzsteuerung 11 steuerbar. Die Frequenzsteu-

erung kann ein akustooptischer Modulator (AOM), aber auch ein Frequenzsteuereingang eines in der Frequenz abstimmbaren Lasers L2 sein.

- Der Ausgangsstrahl des Lasers L1 gelangt auf einen dichroitischen Strahlteiler DST 11, der den Strahl des Lasers L1 mit der Frequenz  $\nu_1$  als Referenzstrahl ablenkt und den Strahl mit der Frequenz  $\nu_2$  als ersten Messstrahl durchlässt. Der erste Messstrahl  $\nu_2$  durchläuft einen zweiten dichroitischen Strahlteiler DST12 und gelangt in ein Interferometer 13.
- 10 Die Frequenz  $\nu_3$  des zweiten Lasers L2 wird durch die Frequenzsteuerung 11 beeinflusst und tritt als Frequenz  $\nu_3$  aus der Frequenzsteuerung 11 als zweiter Messstrahl aus. Er wird durch einen neutralen Strahlteiler ST11 in zwei Anteile geteilt, von denen einer aus dem Strahlengang abgelenkt und auf einen Spiegel S11 geleitet wird, wodurch der Teilstrahl
- 15 auf einen weiteren neutralen Strahlteiler ST12 gelangt, wodurch der abgelenkte Anteil des zweiten Messstrahls  $\nu_3$  kollinear dem von dem dichroitischen Strahlteiler DST11 abgelenkten Referenzstrahl überlagert wird. Der überlagerte Messstrahl gelangt auf einen Fotodetektor PD11. Stimmen die Frequenzen  $\nu_3$  und  $\nu_1$  überein, entsteht eine Differenzfrequenz
- 20  $\Delta\nu = 0$ . Liegt jedoch eine Frequenzabweichung vor, wird eine Schwingungsfrequenz  $\Delta\nu = |\nu_1 - \nu_3|$  mit Hilfe eines Frequenzzählers FZ gemessen.

- Der durch den Strahlteiler ST11 transmittierte Strahlenteil des zweiten Messstrahls  $\nu_3$  wird über einen Spiegel S12 und den dichroitischen Strahlteiler DST12 dem ersten Messstrahl  $\nu_2$  kollinear überlagert, sodass beide Messstrahlen  $\nu_2$ ,  $\nu_3$  auf einen Strahlteiler ST13 des Interferometers 13 gelangen. Der neutrale Strahlteiler ST13 teilt den ankommenden Messstrahl (gebildet aus den überlagerten Messstrahlen  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ ) in einen
- 30 auf einen Referenzspiegel S13 geleiteten Referenzarm und einen mit ei-



nem Messspiegel S14 gebildeten Messarm des Interferometers 13. Die vom Referenzspiegel S13 und vom Messspiegel S14 reflektierten Strahlen werden durch den Strahlteiler ST13 überlagert und gelangen auf einen dichroitischen Strahlteiler DST13 am Ausgang des Interferometers 13. Durch den dichroitischen Strahlteiler DST13 werden die beiden Frequenzen  $\nu_1$ ,  $\nu_3$  voneinander getrennt, da die Frequenz  $\nu_3$  durch den dichroitischen Strahlteiler DST13 auf den Fotodetektor PD13 abgelenkt wird, während die Frequenz  $\nu_2$  des ersten Messstrahls durch den dichroitischen Strahlteiler DST13 hindurchläuft und auf einen Photodetektor PD12 gelangt.

Mittels einer der bekannten Methoden zur Detektion der interferometrischen Phase werden die von den Messstrahlen  $\nu_2$ ,  $\nu_3$  erzeugten Phasen  $\Phi_2$  und  $\Phi_3$  mittels geeigneter Auswerteelektroniken 14, 15 separiert und verarbeitet.

Für die Phasen gilt

$$\Phi_2 = \frac{4\pi \cdot L \cdot n_2 \cdot \nu_2}{c} \text{ und}$$

$$\Phi_3 = \frac{4\pi \cdot L \cdot n_3 \cdot \nu_3}{c},$$

wobei  $n_2$ ,  $n_3$  die integrale Brechzahl entlang der Strecke L bei der optischen Frequenz  $\nu_2$  bzw.  $\nu_3$  ist und c die (Vakuum-)Lichtgeschwindigkeit darstellt.

Da die Frequenzen  $\nu_2$  und  $\nu_3'$  harmonisch zu  $\nu_2 = N \cdot \nu_3'$  korreliert und der Frequenzregelbereich der Frequenzsteuerung 11 nur kleine Änderun-

gen der Frequenz bewirkt, wie unten noch näher erläutert wird, gilt  $v_2 \approx N \cdot v_3'$ .

Dann gilt auch

5

$$\Phi_2 \approx N \cdot \Phi_3$$

In einer Multiplikationsstufe 16 wird die interferometrische Phase  $\Phi_3$  mit dem Faktor N multipliziert und die so gebildete Phase mit der Phase  $\Phi_2$  in einem Phasenkomparator 17 verglichen, indem die Differenz

10

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - N \cdot \Phi_3$$

gebildet wird. Dieses Differenzsignal wird über einen Regelverstärker 18, der im dargestellten Ausführungsbeispiel ein PI-Verstärker (Proportional-Integral-Verstärker) ist, verstärkt und der Frequenzsteuerstufe 11 so zugeleitet, dass als Regelkriterium

15

$$\Delta\Phi = 0$$

20

gilt. Somit wird ein interferometrischer Phasenregelkreis realisiert, der dafür sorgt, dass die integralen optischen Wellenlängen der beiden im Interferometer umlaufenden Strahlen entlang der Messstrecke L des Interferometers 13 exakt harmonisch korreliert sind gemäß

25

$$N \cdot \lambda_2 = \lambda_3, \text{ mit } \lambda_2 = \frac{c}{v_2 \cdot n_2}, \lambda_3 = \frac{c}{v_3 \cdot n_3}.$$

Damit lässt sich aus der Kenntnis der optischen Frequenz  $\nu_2$  und der Messung der Frequenzdifferenz  $\Delta\nu$  in dem Frequenzzähler FZ die integrale Brechzahl  $n_2$  aus

$$n_2 = \frac{\nu_2 + N \cdot \Delta\nu}{\nu_2 + N \cdot \Delta\nu - N \cdot A \cdot \Delta\nu}$$

berechnet. Die in diesem Ausdruck enthaltene inverse Dispersion  $A$ , die als

$$A = \frac{n_2 - 1}{n_2 - n_3}$$

definiert ist, lässt sich für Messstrecken in Luft normaler Zusammensetzung aus der so genannten modifizierten Edlen Formel berechnen (vgl. G. Bönsch, E. Potulski „Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlen's formulae“, Metrologia 35 (1998), 133-139) bestimmen oder mit Hilfe einer geeigneten Vorrichtung messen (vgl. z.B. US 2002/0001086 A1),

Die physikalische Weglängendifferenz  $L$  im Interferometer ergibt sich damit zu

$$L = \frac{\phi_2 \cdot c}{4\pi \cdot n_2 \cdot \nu_2} = \frac{\phi_2 \cdot c}{4\pi \cdot \frac{\nu_2 + N \cdot \Delta\nu}{\nu_2 + N \cdot \Delta\nu - N \cdot A \cdot \Delta\nu} \cdot \nu_2} = \frac{c \cdot \phi_2 \cdot (\nu_2 + N \cdot \Delta\nu - N \cdot A \cdot \Delta\nu)}{4 \cdot \pi \cdot \nu_2 \cdot (\nu_2 + N \cdot \Delta\nu)}$$

Daher lassen sich mit der Erfindung bei einer Verschiebemessung des Messspiegels S14 oder bei einer Positionsmessung sowohl die Brechzahl als auch die Brechzahlfluktuationen entlang der zu messenden Strecke

mit hoher Präzision kompensieren. Bei dem in Figur 2 dargestellten Ausführungsbeispiel emittiert der erste Laser L1 die Frequenzen  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ , während der zweite Laser L2 als in seiner Frequenz abstimmbarer Laser ausgebildet ist und daher die Frequenz  $\nu_3$  abstrahlt. Zur Messung der Frequenzdifferenz  $\Delta\nu = |\nu_3 - \nu_1|$  sind – wie in Figur 1 – der dichroitische Strahlteiler DST21, die neutralen Strahlteiler ST 21 und ST22 und der Spiegel S21 vorgesehen. Die optische Frequenzdifferenz wird durch den Photodetektor 21 elektrisch umgesetzt und in dem Frequenzzähler FZ elektrisch ausgewertet. Der zweite Messstrahl  $\nu_3$  wird über den Spiegel S22 und den Strahlteiler ST23 erst im Messstrahl  $\nu_2$  überlagert und in dieser Form auf das Interferometer 13' geleitet. Durch den Neutralstrahlteiler ST 23 werden die überlagerten Strahlen aber auch über einen Spiegel S23 auf einen akustooptischen Modulator (AOM) 20 geführt, der zumindest Teile der beiden Strahlen in der Frequenz definiert verschiebt. Hierbei wird die Frequenz des Strahls der optischen Frequenz  $\nu_2$  um die (Radio-) Frequenz  $2\Omega$  und die Frequenz des Strahls der optischen Frequenz  $\nu_3$  um die Frequenz  $\Omega$  verschoben. Hierzu werden die Frequenzen  $\Omega$ ,  $2\Omega$  über einen Hochfrequenzgenerator 21 auf einen Steuereingang des AOM 20 geleitet. Die beiden optischen Strahlen durchlaufen kollinear den AOM. Da gemäß dem dargestellten Ausführungsbeispiel die optischen Frequenzen  $\nu_3$  und  $\nu_2$  in sehr guter Näherung das gleiche Frequenzverhältnis bilden wie die Hochfrequenzen  $\Omega$ , und  $2\Omega$ , ist die Bragg-Bedingung im AOM in einer Raumrichtung gleichzeitig für die optische Frequenz  $\nu_3$  und die Hochfrequenz  $\Omega$  elektronisch und optisch gefiltert, wie unten noch erläutert wird, und stört daher das hier beschriebene Messverfahren nicht.

Die beiden im Strahlteiler ST23 kollinear überlagerten Teilstrahlen, die direkt in das Interferometer 13' geleitet werden, treten durch den Strahlteiler ST24 hindurch und werden an einem innerhalb der Mess-Weglänge

L verschiebbaren Reflektor 21 reflektiert und durch den Strahlteiler ST24 auf einen dichroitischen Strahlteiler 22 geleitet. In dem dargestellten Ausführungsbeispiel ist der Reflektor 21 als verspiegeltes Dachkantprisma ausgeführt. Am Ausgang des Strahlteilers 24 sind die reflektierten Messstrahlen mit den durch den AOM 20 modulierten Referenzstrahlen kollinear überlagert. Der dichroitische Strahlteiler DST22 separiert die Strahlen in zwei Teilstrahlen, die mittels Photodetektoren PD23 und PD24 in elektrische Signale umgesetzt werden. Der durch den dichroitischen Strahlteiler DST22 hindurchtretende Anteil weist eine Schwebung der Frequenz  $2\Omega$  auf. Diese wird mittels eines geeigneten Bandpassfilters BP21 aus dem elektrischen Signal mit der Frequenz  $2\Omega$  extrahiert. Analog erzeugen die an dem dichroitischen Strahlteiler DST22 reflektierten Strahlen auf dem Detektor PD23 ein Schwebungssignal der Frequenz  $\Omega$ , das aus dem Detektorsignal wiederum mittels eines geeigneten Bandpassfilters BP22 der Frequenz  $\Omega$  extrahiert wird.

Bei diesem Heterodyn-Interferometer wird die durch eine Verschiebung des Reflektors 21 erzeugte interferometrische Phasenverschiebung zwischen Referenz- und Messstrahl auf eine gleich große Phasenverschiebung der Heterodynfrequenz abgebildet. Da  $v_2$  ungefähr  $2 \cdot v_3$  und damit auch für die optischen Wellenlängen  $\lambda_3 \approx 2 \cdot \lambda_2$  gilt, ist in dem hier beschriebenen Doppel-Heterodyn-Interferometer bei einer Verschiebung des Reflektors 21 die resultierende Phasenverschiebung des Heterodynsignals der Frequenz  $2\Omega$  etwa doppelt so groß wie die resultierende Phasenverschiebung des Heterodynsignals der Frequenz  $\Omega$ . Die letztere Phasenverschiebung wird mit Hilfe eines Hochfrequenz-Frequenzverdopplers 22 verdoppelt und die Phase des verdoppelten Signals mit einem Phasenkompator DBM in Form eines doppelt balancierten Mischers mit der Phase des Heterodynsignals der Frequenz  $2\Omega$  verglichen. Der Phasen-

komperator enthält ein nachgeschaltetes Tiefpassfilter mit geeigneter Grenzfrequenz  $\ll 4 \Omega$ .

Die Frequenz des vom Laser L2 emittierten Strahls  $\nu_3$  wird mit Hilfe eines  
 5 PI-Reglers 23 soweit verändert, dass das Ausgangssignal des Phasenkomperator DBM verschwindet, sodass für die optischen Wellenlängen gilt  $\lambda_3 = 2 \cdot \lambda_2$ . Um die Eindeutigkeit der Regelung herzustellen, die durch das periodische Ausgangssignal des DBM nicht für sich sichergestellt ist, kann man eine kleine Weglängendifferenz  $\Delta L$  der Messlänge L des Interferometers 13' einstellen. Die Weglängendifferenz  $\Delta L$  muss so die Bedingung für das mehrdeutige Ausgangssignal des DBM eine größere einzustellende Frequenzdifferenz  $\Delta \nu$  als maximale Differenzfrequenz  $\Delta \nu_{\max}$  vorgegeben wird. In diesem Falls ist die Regelung eindeutig mit nur einem  $\Delta \nu$  möglich.

15

Somit ist wieder ein interferometrischer Phasenregelkreis realisiert, der dafür sorgt, dass  $\lambda_3 = 2 \cdot \lambda_2$  gilt. Es gilt:

$$n_2 = \frac{\nu_2 + 2 \cdot \Delta \nu}{\nu_2 + 2 \cdot \Delta \nu - 2 \cdot A \cdot \Delta \nu}$$

20

und für die physikalische Weglängendifferenz L im Interferometer

$$L = \frac{c \cdot \phi_2 \cdot (\nu_2 + 2 \cdot \Delta \nu - 2 \cdot A \cdot \Delta \nu)}{2 \cdot \pi \cdot \nu_2 \cdot (\nu_2 + 2 \cdot \Delta \nu)}$$

Die hierfür benötigte Phase  $\Phi_2$  kann mittels bekannter Techniken, etwa  
 25 mittels einem kommerziell erhältlichen I/Q-Demodulator 24 gewonnen werden.

Eine mögliche Modifikation der Ausführung der Erfindung gemäß Figur 2, die mit nur einem Laser L1 auskommt, ist in Figur 3 dargestellt. Der vom Laser L1 emittierte Strahl der Frequenz  $\nu_1$  wird mittels eines sehr breitbandigen, beispielsweise akustooptischen Frequenzschiebers AOM 36 um die Frequenz  $\Delta\nu$  in der Frequenz verschoben, sodass  $\nu_3 = \nu_1 + \Delta\nu$  gilt.

Derartige breitbandige Frequenzschieber mit spannungsgesteuertem Mikrowellentreiber (VCO) 35 sind kommerziell erhältlich. Im Übrigen entspricht das Ausführungsbeispiel im Wesentlichen der Figur 2, wobei sich das als Messsignal dienende Maß für die Frequenzdifferenz unmittelbar aus der Frequenz des VCO 35 ergibt.

15

20

25

30

35

## 5 Ansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung der Brechzahl und/oder Kompensation des Brechzahleinflusses bei interferometrischen Längenmessungen mit Hilfe eines mit wenigstens zwei Messstrahlen ( $\nu_2$ ,  $\nu_3$ ) mit wenigstens definierten, etwa in einem harmonischen Verhältnis zueinander stehenden Frequenzen beaufschlagten Interferometers (13, 13'), an dessen Ausgang interferometrisch Phasen für die wenigstens zwei Messstrahlen ( $\nu_2$ ,  $\nu_3$ ) ausgewertet werden, wobei eine dem harmonischen Verhältnis der Frequenzen der Messstrahlen ( $\nu_2$ ,  $\nu_3$ ) entsprechende Multiplikation der interferometrischen Phasen vorgenommen und wenigstens eine Phasendifferenz der so gebildeten Phasenwerte betrachtet wird, **dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens einer der Messstrahlen ( $\nu_3$ ) in seiner Frequenz variabel ist und dass aus der gebildeten Phasendifferenz ein Steuersignal zur Veränderung der Frequenz des in seiner Frequenz veränderbaren Messstrahls ( $\nu_3$ ) gebildet wird, mit dem die Frequenz so geregelt wird, dass die Phasendifferenz zu Null wird.**
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens ein Referenzstrahl ( $\nu_1$ ) mit einer Frequenz erzeugt wird, die etwa der Frequenz eines der Messstrahlen ( $\nu_3$ ) entspricht und mit der Frequenz eines anderen Messstrahls ( $\nu_2$ ) gekoppelt ist und dass eine Frequenzdifferenz zwischen der Frequenz des Referenzstrahls ( $\nu_1$ ) und der Frequenz des entsprechenden Messstrahls ( $\nu_3$ ) gemessen wird.**



3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass einer der Messstrahlen ( $v_2$ ) und der Referenzstrahl ( $v_1$ ) durch eine kohärente Strahlenquelle (L1) mit einem Frequenzmultiplizierer generiert werden.
- 5
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass beide Messstrahlen ( $v_2$ ,  $v_3$ ) mittels eines Frequenzschiebers (36) aus einem Strahl einer kohärenten Strahlenquelle (L1) abgeleitet werden:
- 10
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass den überlagerten Messstrahlen ( $v_2$ ,  $v_3$ ) in einem Referenzzweig des Interferometers (13') Hochfrequenzen ( $\Omega$ ,  $2\Omega$ ) aufmoduliert werden, die im gleichen harmonischen Verhältnis zueinander wie die Frequenzen eines der Messstrahlen ( $v_2$ ) zu dem Referenzstrahl ( $v_1$ ).
- 15
6. Interferometeranordnung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 5, mit wenigstens einer kohärenten Strahlenquelle (L1, L2) zur Generierung wenigstens zweier Messstrahlen ( $v_2$ ,  $v_3$ ) mit definierten, etwa in einem harmonischen Verhältnis zueinander stehenden Frequenzen und einem Interferometer (13, 13'), dessen Ausgangssignale auf einen die Messstrahlen trennenden Strahlteiler (DST 13, DST 22, DST 32) gelangen, wobei die getrennten Messstrahlen auf opto-elektronische Wandler (PD12, PD13; PD22, PD23; PD32, PD33) gelangen und wenigstens eines der Ausgangssignale der opto-elektrischen Wandler einem dem harmonischen Verhältnis der Frequenzen der Messstrahlen ( $v_2$ ,  $v_3$ ) entsprechenden Multiplikator (16, 22, 32) zugeführt wird, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens einer der Mess-
- 20
- 25
- 30

- 5 strahlen ( $\nu_3$ ) in seiner Frequenz mittels einer Frequenzsteuerung (18, 23, 35) variierbar ist und dass mittels eines Phasenvergleichers (17, DBM) für die Phasen der Ausgangssignale der optoelektrischen Wandler (PD12, PD13, PD22, PD23; PD32, PD33) ein
- 10 eine Phasendifferenz repräsentierendes Steuersignal generiert und der Frequenzsteuerung (18, 23, 35) zur Bildung eines Regelkreises für die interferometrischen Phasen ( $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$ ) zugeleitet wird.
7. Interferometeranordnung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die kohärente Strahlungsquelle (L1, L2) zur Generierung
- 15 wenigstens eines Referenzstrahls ( $\nu_1$ ) ausgelegt ist, dessen Frequenz etwa der Frequenz eines der Messstrahlen ( $\nu_3$ ) entspricht und mit der Frequenz eines anderen Messstrahls ( $\nu_2$ ) harmonisch gekoppelt ist.
8. Interferometeranordnung nach Anspruch 6 oder 7, gekennzeichnet durch einen einer kohärenten Strahlenquelle (L1, L2) zugeordneten Frequenzmultiplizierer.
- 20 9. Interferometeranordnung nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass in einem Referenzzweig des Interferometers (13, 13') ein Frequenzmodulator (30) eingesetzt ist dessen Steuerung mit einem Hochfrequenzgenerator für zwei Hochfrequenzen ( $\Omega$ ,  $2\Omega$ ) verbunden ist, deren Frequenzen im Verhältnis
- 25 der Frequenzen der Messstrahlen ( $\nu_2$ ,  $\nu_3$ ) zueinander stehen.

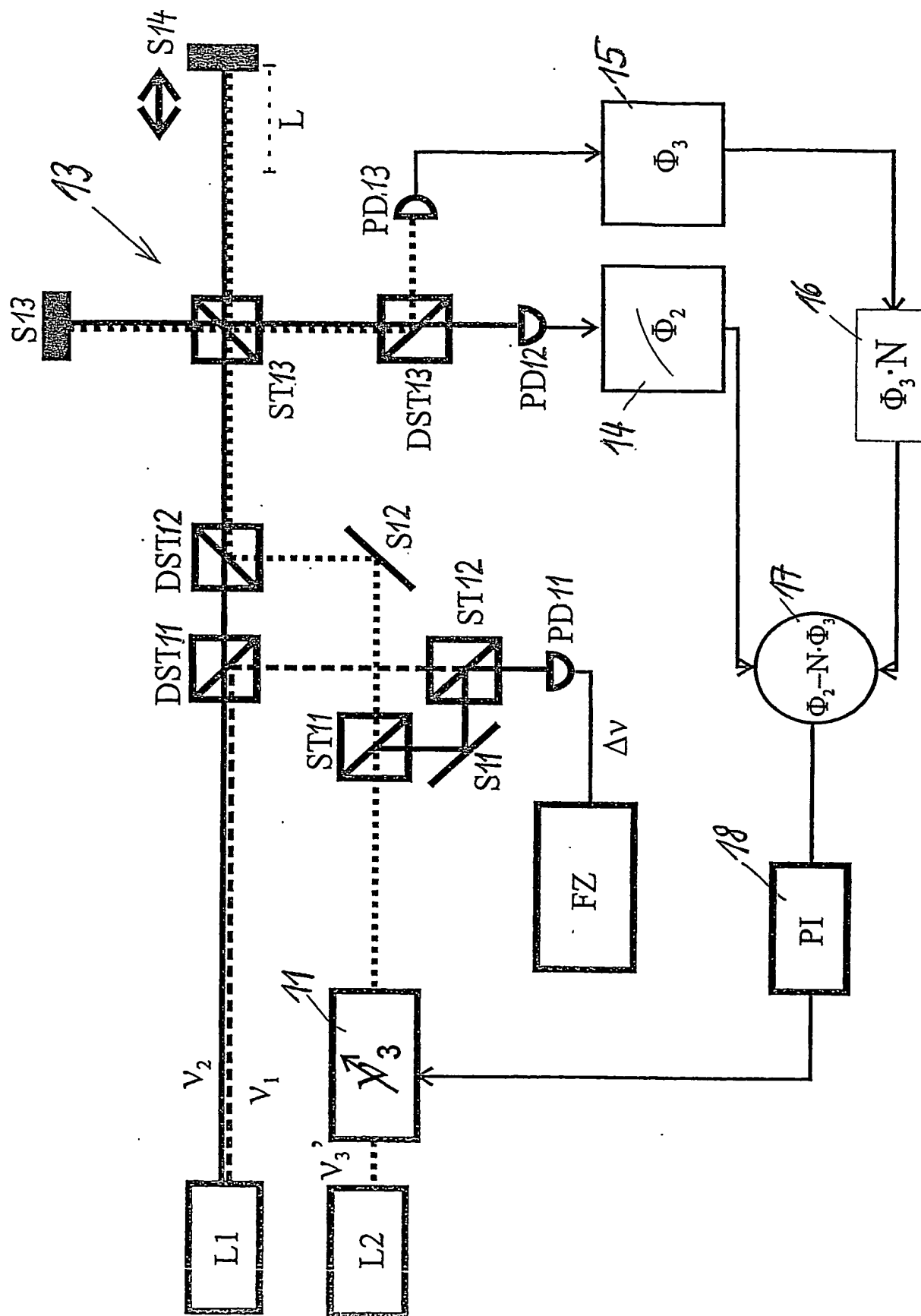


Fig. 1

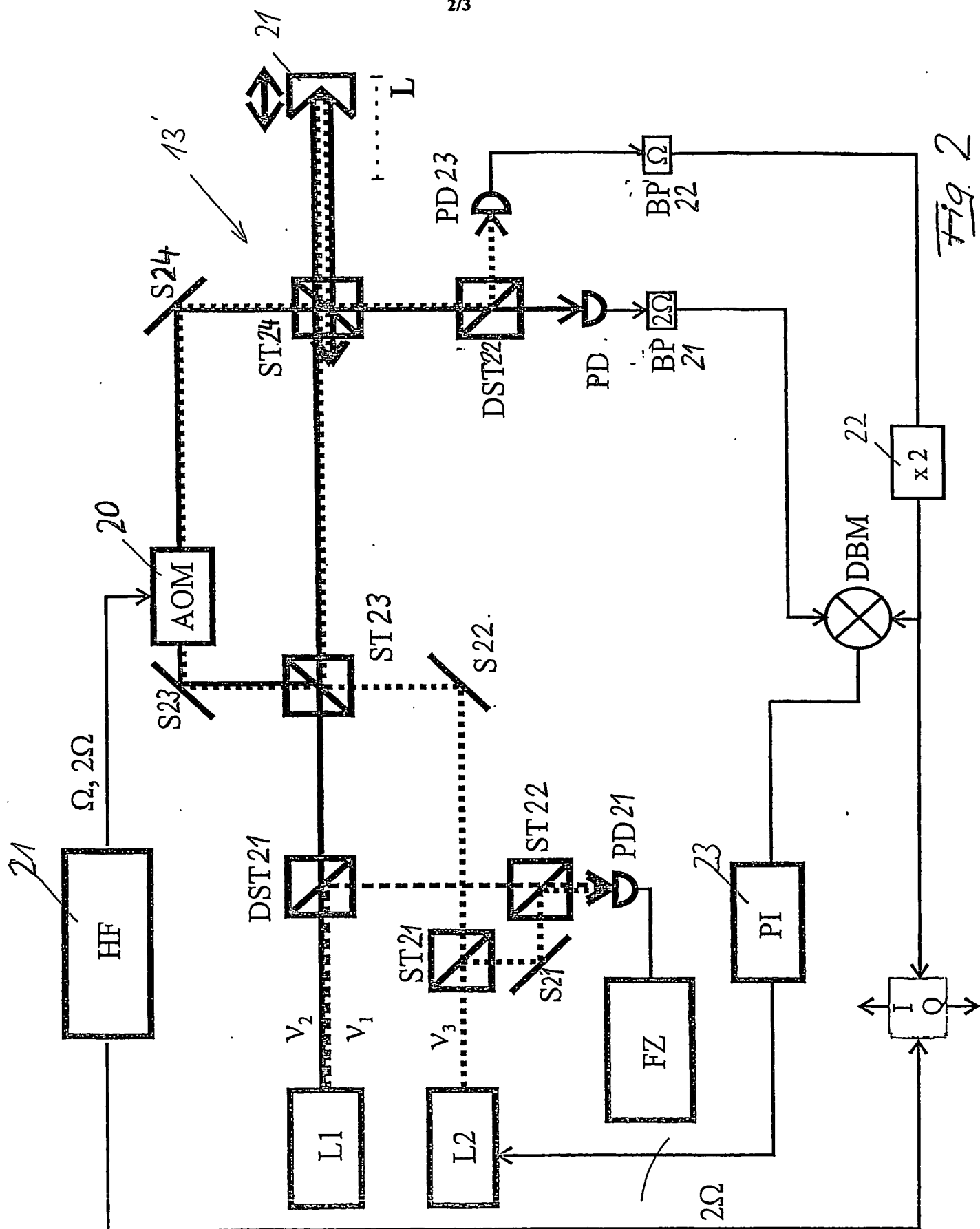


Fig. 2

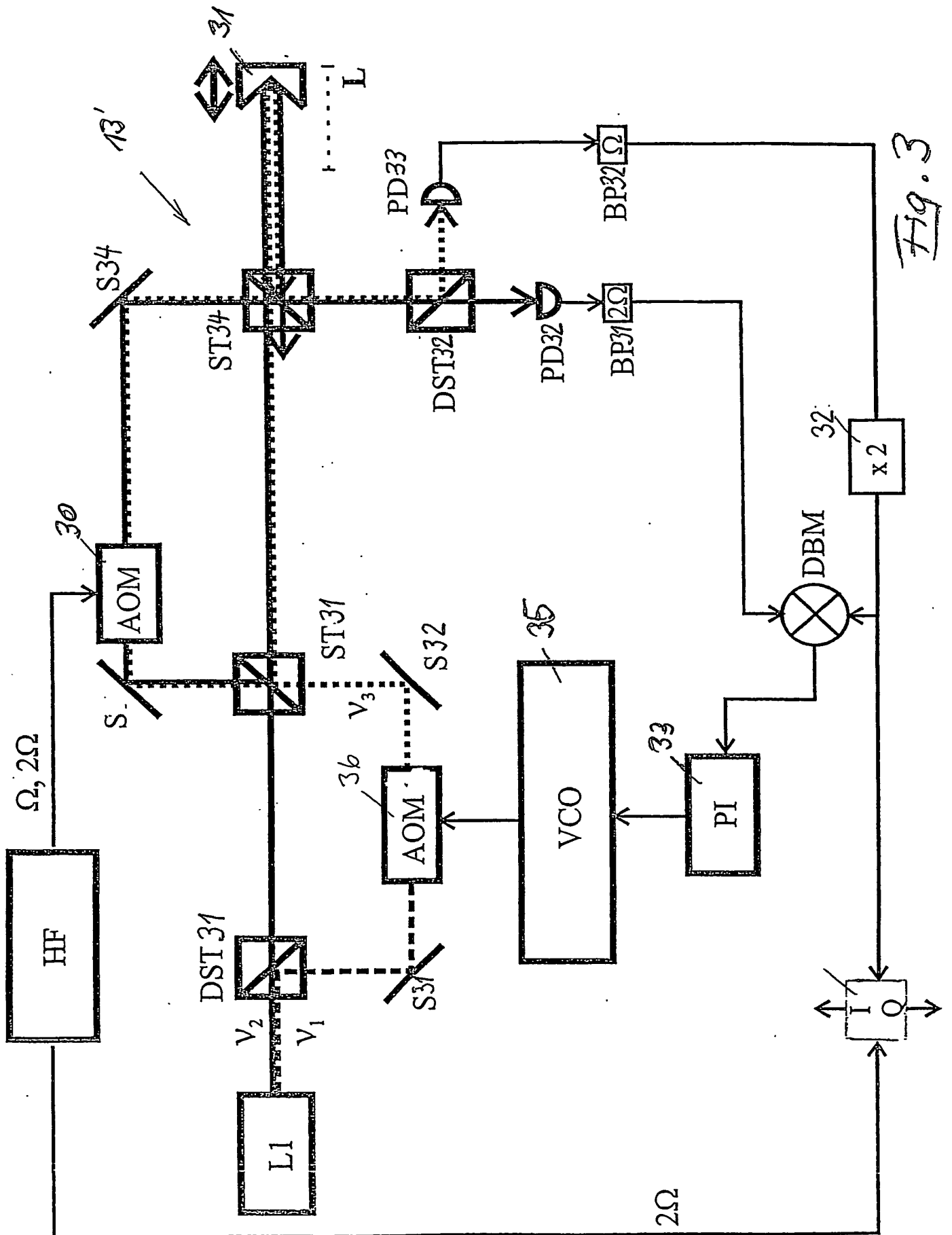


Fig. 3

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

IPC 7 G01B9/02 G01N21/45

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G01B G01N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the International search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X,P	BODERMANN B, FLÜGGE J, MEINERS-HAGEN K: "Improved second-harmonic two-wavelength interferometer with refractive index correction without effect modulation" PROCEEDINGS OF SPIE- RECENT DEVELOPMENTS IN TRACEABLE DIMENSIONAL MEASUREMENTS II, vol. 5190, no. 1, 4 August 2003 (2003-08-04), - 6 August 2003 (2003-08-06) pages 339-346, XP002302631 SAN DIEGO, CA, USA the whole document	1-9
A	US 6 014 216 A (ZORABEDIAN PAUL) 11 January 2000 (2000-01-11) column 5, line 21 - line 28 ----- -/--	1-9



Further documents are listed in the continuation of box C.



Patent family members are listed in annex.

## \* Special categories of cited documents:

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

\*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

\*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

\*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

\*Z\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

26 October 2004

Date of mailing of the international search report

08/11/2004

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Navas Montero, E

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/DE2004/001321

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5 412 474 A (REASENBERG ROBERT D ET AL) 2 May 1995 (1995-05-02) column 11, line 30 - line 60 -----	1-9
A	WO 99/42787 A (ZYGO CORP) 26 August 1999 (1999-08-26) page 43, line 31 - page 44, line 12; figure 1a -----	1-9

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/DE2004/001321

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 6014216	A	11-01-2000	CN 1260474 A	19-07-2000
			DE 19944018 A1	10-08-2000
			GB 2346967 A , B	23-08-2000
			JP 2000205814 A	28-07-2000
			TW 469341 B	21-12-2001
US 5412474	A	02-05-1995	NONE	
WO 9942787	A	26-08-1999	EP 1058813 A1	13-12-2000
			JP 3332367 B2	07-10-2002
			JP 2002504671 T	12-02-2002
			TW 382652 B	21-02-2000
			US 2002140945 A1	03-10-2002
			US 2002140946 A1	03-10-2002
			WO 9942787 A1	26-08-1999
			US 2002131053 A1	19-09-2002
			US 6327039 B1	04-12-2001
			US 6407816 B1	18-06-2002



A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
 IPK 7 G01B9/02 G01N21/45

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
 IPK 7 G01B G01N

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, INSPEC

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X,P	BODERMANN B, FLÜGGE J, MEINERS-HAGEN K: "Improved second-harmonic two-wavelength interferometer with refractive index correction without effect modulation" PROCEEDINGS OF SPIE- RECENT DEVELOPMENTS IN TRACEABLE DIMENSIONAL MEASUREMENTS II, Bd. 5190, Nr. 1, 4. August 2003 (2003-08-04), - 6. August 2003 (2003-08-06) Seiten 339-346, XP002302631 SAN DIEGO, CA, USA das ganze Dokument	1-9
A	US 6 014 216 A (ZORABEDIAN PAUL) 11. Januar 2000 (2000-01-11) Spalte 5, Zeile 21 - Zeile 28 ----- -/--	1-9



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

- \*A\* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
- \*E\* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
- \*L\* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
- \*O\* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
- \*P\* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

- \*T\* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
- \*X\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
- \*Y\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
- \*Z\* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

26. Oktober 2004

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

08/11/2004

Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde  
 Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
 NL - 2280 HV Rijswijk  
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Navas Montero, E

## C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie°	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 5 412 474 A (REASENBERG ROBERT D ET AL) 2. Mai 1995 (1995-05-02) Spalte 11, Zeile 30 – Zeile 60 -----	1-9
A	WO 99/42787 A (ZYGO CORP) 26. August 1999 (1999-08-26) Seite 43, Zeile 31 – Seite 44, Zeile 12; Abbildung 1a -----	1-9

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE2004/001321

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 6014216	A	11-01-2000	CN 1260474 A	19-07-2000
			DE 19944018 A1	10-08-2000
			GB 2346967 A , B	23-08-2000
			JP 2000205814 A	28-07-2000
			TW 469341 B	21-12-2001
US 5412474	A	02-05-1995	KEINE	
WO 9942787	A	26-08-1999	EP 1058813 A1	13-12-2000
			JP 3332367 B2	07-10-2002
			JP 2002504671 T	12-02-2002
			TW 382652 B	21-02-2000
			US 2002140945 A1	03-10-2002
			US 2002140946 A1	03-10-2002
			WO 9942787 A1	26-08-1999
			US 2002131053 A1	19-09-2002
			US 6327039 B1	04-12-2001
			US 6407816 B1	18-06-2002